





## Diamond electrodes

**Patent number:** DE19911746  
**Publication date:** 2000-09-21  
**Inventor:** PUETTER HERMANN (DE); WEIPER-IDELMANN ANDREAS (DE); MERK CLAUDIA (DE)  
**Applicant:** BASF AG (DE)  
**Classification:**  
- **international:** C25B3/00; C23C16/26  
- **european:** C02F1/461B2; C25B3/00; C25B11/04D  
**Application number:** DE19991011746 19990316  
**Priority number(s):** DE19991011746 19990316

**Also published as:**

 EP1036861 (A1)  
 US6533916 (B1)  
 JP2000313982 (A)  
 EP1036861 (B1)

**Report a data error here**

Abstract not available for DE19911746

Abstract of corresponding document: **US6533916**

An electrode consisting of a substrate and a diamond layer applied to the substrate, in which the applied diamond layer is pore-free, and a process for producing a diamond-coated electrode, in which the process comprises at least the following steps: a) cleaning the surface of the substrate; b) seeding the surface of the substrate with a high diamond nucleation density; c) coating the surface of the substrate with diamond.

---

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



⑮ **BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 199 11 746 A 1**

⑤ Int. Cl.7:  
**C 25 B 3/00**  
C 23 C 16/26

⑲ Aktenzeichen: 199 11 746.2  
⑳ Anmeldetag: 16. 3. 1999  
㉑ Offenlegungstag: 21. 9. 2000

**DE 199 11 746 A 1**

⑦① **Anmelder:**

BASF AG, 67063 Ludwigshafen, DE

⑦④ **Vertreter:**

Patent- und Rechtsanwälte Bardehle, Pagenberg,  
Dost, Altenburg, Geissler, Isenbruck, 68165  
Mannheim

⑦② **Erfinder:**

Pütter, Hermann, Dr., 67433 Neustadt, DE;  
Weiper-Idelmann, Andreas, Dr., 67165 Waldsee, DE;  
Merk, Claudia, Dr., 67117 Limburgerhof, DE

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤④ **Diamantelektroden**

⑤⑦ **Verfahren zur Herstellung einer mit Diamant beschich-  
teten Elektrode, wobei das Verfahren mindestens die fol-  
genden Schritte umfaßt:**

- a) Reinigen der Oberfläche des Grundkörpers;
- b) Bekeimen der Oberfläche des Grundkörpers mit einer  
hohen Diamantkeimdichte;
- c) Beschichten der Oberfläche des Grundkörpers mit Dia-  
mant.

**DE 199 11 746 A 1**

Die vorliegende Erfindung betrifft mit Diamant beschichtete Elektroden, im folgenden kurz als Diamantelektroden bezeichnet, die bei Umsetzungen organischer Verbindungen einsetzbar sind und ein Verfahren zur Herstellung solcher Diamantelektroden.

Kohlenstoffelektroden, wie Graphit oder neuerdings auch Glaskohlenstoff, sind in der Elektrochemie bekannt und werden aufgrund ihrer relativ guten elektrischen Leitfähigkeit industriell genutzt. Diamant als weitere Modifikation des Kohlenstoffs besaß bisher aufgrund seines geringen Vorkommens und seiner Eigenschaft als Isolator keine große Bedeutung in der industriellen Anwendung.

Es stellte sich aber zwischenzeitlich heraus, daß besonders modifizierte Diamantelektroden sich in organischen Lösungsmitteln, wie Methanol, THF, DMF oder Acetonitril in Reaktivität und Selektivität ähnlich den konventionellen Graphitelektroden verhalten. Insofern können die Vorteile der mit Diamant beschichteten Elektroden nutzbar gemacht werden. Dies ist vor allem das inerte chemische Verhalten gegenüber aggressiven Chemikalien (z. B. Fluorwasserstoff). Weiterhin zeigen Diamantelektroden den Vorteil, daß ein breiter Potentialbereich nutzbar gemacht werden kann, in Wasser beispielsweise in einem Bereich von -1.2 V bis 2.3 V, ohne daß das Lösungsmittel angegriffen wird. Neben den Vorteilen des Diamants gegenüber Graphit lassen sich auch die Nachteile des Graphits durch Verwendung von Diamantelektroden beseitigen. Dies sind zum einen die mechanischen Nachteile des Graphits, wie zum Beispiel Abrasion und Quellung der nichtkristallinen Schichten, zum anderen die chemischen Nachteile wie beispielsweise Korrosion, vor allem gegenüber Wasser, Intercalation von organischem Material in die Graphitschichten, die Schichtgitteraufweitung bei Hydrierungen und die mögliche Oxidation des Graphits. Bei der Umsetzung organischer Verbindungen kamen bislang überwiegend Graphitelektroden zur Anwendung. So werden zum Beispiel in einer Kapillarzelle, die von Beck und Guthke im Jahr 1969 entwickelt wurde, elektrochemische Oxidationen an Graphitelektroden, wie z. B. die Methoxylierung von Furan zu Dimethoxydihydrofuran oder die Kolbeelektrolyse von Adipinsäuremonoestern zu 1,10-Sebacinsäureestern, durchgeführt. Bei Verwendung von Graphit können allerdings durch die raue Oberfläche und den Graphitabrieb während der Elektrolyse Graphitpartikel zu Kurzschlüssen führen. Graphitblöcke, die mit Metallfolien überzogen werden, haben sich als zu wenig stabil herausgestellt. Die Metallfolien wellen sich und platzen ab (F. Wenisch, H. Nohe, H. Hannebaum, D. Degner, R. K. Horn, M. Stroezel, AlChE Symposium Series 1979, 75, 14; H. Nohe, AlChE Symposium Series 1979, 75, 69). Daneben sind zahlreiche Oxidationen von Aromaten an Graphit bekannt (D. Degner, Topics in Current Chemistry 1988, 148, 3-95). Aus dem US-Patent US 5,399,247 ist der Abbau von organischen Verbindungen im Abwasser unter Einsatz von Diamantelektroden bekannt. Gemäß dieser Patentschrift verläuft der Abbau wäßriger organischer Restkomponenten, wie beispielsweise von Hydrochinon, sehr gut. Auch Phenol läßt sich sehr gut an Diamantelektroden abbauen. Zur präparativen Synthese organischer Verbindungen wurden Diamantelektroden allerdings bislang nicht eingesetzt. Dies lag unter anderem daran, daß man bisher nicht in der Lage war, ausreichend große Flächen von Elektrodenflächen mit Diamant zu beschichten. Außerdem waren die Schichten in organischen Lösungsmitteln bisher nicht stabil genug.

Die hauptsächlichen Einsatzgebiete von Diamantschichten lagen bislang im Werkzeugbau, oder im Falle der elektrisch leitfähigen Diamantschichten auch im Bereich der

Sensorik. In der Elektrochemie finden sie weiterhin Anwendung als Elektrodenmaterial, so zum Beispiel zur Reduktion von Nitrat zu Ammoniak.

Das US-Patent US 5,399,247 beschreibt, wie oben bereits kurz erwähnt, beispielsweise die Anwendung von Diamantelektroden zum Abbau von Industrieabwasser am Beispiel von Photo-Entwickler-Bädern. Das japanische Patent JP 09013188 betrifft die Nutzung von Oxidation, Reduktion und Halogenierung zur Modifizierung der Oberflächen der Diamantelektroden.

Weiterhin gibt es zahlreiche Studien über Diamantelektroden mit Anwendung in der Analytik für Cyclische Voltammetrie (CV). Hier benötigen die Diamantelektroden nur eine sehr kleine Fläche von etwa 10 mm<sup>2</sup> oder Drähte mit einer Länge im mm-Bereich und auch nur eine sehr dünne, durch einfache Beschichtung erhaltene Diamantschicht. Hierbei wird die Eigenschaft der Passivierung des beschichteten Metalls, wobei es sich in der Regel um Titan handelt, in Wasser genutzt. In organischen Medien, selbst mit geringfügigen Wassergehalten gelingt eine solche Passivierung nicht. Insofern sind die Elektroden hier nicht ausreichend resistent gegenüber aggressiven Materialien. Diese Art Diamantelektroden war somit nicht geeignet, um sie bei Umsetzungen organischer Verbindungen einzusetzen. Hier sind großflächige, nahezu porenfreie und dichte Diamantschichten auf den entsprechenden Trägerelektroden nötig.

Bezüglich der Herstellung von Diamantschichten wurden parallel zu der Hochdruck/Hochtemperatur-Synthese (HPHT-Synthese) auch Niederdruckverfahren zur Herstellung von Diamant entwickelt, die zunächst als unwirtschaftlich erachtet und nicht weiter verfolgt wurden. Beruhend auf diesen frühen Arbeiten wurden in den achtziger Jahren aktivierte Gasphasen-Depositionsverfahren (chemical vapor deposition, CVD) zur Synthese von Diamantschichten bis zur Marktreife entwickelt.

In Anbetracht des obigen Stands der Technik lag eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung darin, eine Diamantelektrode bereitzustellen, die zum Einsatz bei Umsetzungen organischer Verbindungen geeignet ist, und ein Verfahren zu deren Herstellung.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch eine Diamantelektrode und ein Verfahren zu deren Herstellung, wie sie in den unabhängigen Ansprüchen definiert sind, gelöst. Zweckmäßige Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

Demgemäß betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Herstellung einer mit Diamant beschichteten Elektrode, wobei das Verfahren mindestens die folgenden Schritte umfaßt:

- a) Reinigen der Oberfläche des Grundkörpers;
- b) Bekeimen der Oberfläche des Grundkörpers mit einer hohen Diamantkeimdichte;
- c) Beschichten der Oberfläche des Grundkörpers mit Diamant.

Durch diese Vorgehensweise wird die Ausbildung von Poren in der Diamantschicht verhindert, bzw. weitgehend unterdrückt. Poren traten bei bisher bekannten Beschichtungen mit Diamant in vergleichsweise sehr hoher Zahl auf. Derartige Poren entstehen beim Beschichtungsprozess durch Verunreinigungen auf der zu beschichtenden Oberfläche. Diese Bereiche können von der Diamantschicht nicht überwachsen werden, so daß nicht beschichtete und damit korrosionsanfällige Bereiche an der Oberfläche des zu beschichtenden Grundkörpers vorliegen.

Erst durch die erfindungsgemäße Bekeimung mit einer hohen Diamantkeimdichte und vorzugsweise mehrmaliges,

d. h. mindestens zweimaliges Beschichten der Oberfläche des Grundkörpers mit Diamant, gekoppelt mit einer angemessenen Reinigungsprozedur vor jedem Beschichtungsschritt ist es möglich geworden, eine angemessen großflächige, porenfreie und dichte Diamantschicht auf der Oberfläche des entsprechenden Grundkörpers und somit eine für die Anwendung bei der Umsetzung organischer Verbindungen geeignete Elektrode zu schaffen. Durch das erfindungsgemäße Verfahren ist es möglich, geeignete Diamantschichten von einer Fläche bis zu 300.000 mm<sup>2</sup>, vorzugsweise mit einer Fläche im Bereich von 3.000 bis 300.000 mm<sup>2</sup>, weiter bevorzugt 10.000 bis 300.000 mm<sup>2</sup>, herzustellen. Porenfreiheit bedeutet im Rahmen der Erfindung, daß keine Pore nachweisbar ist. Die Kontrolle der Porosität wird durch Aufbringen von Flußsäure auf die hergestellte Diamantschicht vorgenommen, wobei es bei Anwesenheit von Poren instantan zu einer erheblichen Wasserstoffbildung kommen würde. Durch das erfindungsgemäße Verfahren werden Diamantschichtdicken für technische Elektrodenmaterialien in einem Bereich von 1 µm bis 50 µm hergestellt. Bei Siliciumelektroden werden Diamantschichten mit einer Dicke von 0,25 µm bis 10 µm möglich.

Vorzugsweise wird im Falle von glatten Elektrodenoberflächen der Elektrodengrundkörper vor dem ersten Reinigungsschritt, vorzugsweise mechanisch aufgeraut. Dies geschieht vorzugsweise durch Sandstrahlen, vorzugsweise mit einem Druck von 5 bis 7 bar. Durch diese Aufrauung der Oberfläche wird zunächst eine möglichst gute Verankerung der noch aufzubringenden Diamantschicht erzielt. Bei der Verwendung von Graphit für den Grundkörper ist ein Aufrauen hingegen nicht notwendig, da hier bereits im Ausgangszustand eine ausreichende Rauigkeit gegeben ist. Eine gewisse Rauigkeit ist notwendig, um eine ausreichende Haftfestigkeit zu erzielen. Die dadurch gegebene mechanische Verankerung ist besonders bei Materialien mit großem thermischen Ausdehnungskoeffizienten notwendig.

Anschließend erfolgt eine Reinigung der Oberfläche des Grundkörpers, z. B. um Sandkörner zu entfernen. Dies erfolgt vorzugsweise mittels einer Ultraschallbehandlung in einem organischen Lösungsmittel, vorzugsweise für die Dauer von etwa 30 Minuten. Das Reinigen ist grundsätzlich notwendig und dient der Konditionierung der Oberfläche der Elektrode für die darauffolgende Beschichtung. Es handelt sich hierbei um in der Beschichtungstechnologie bekannte Verfahren, die jeweils auf die Beschichtung und das Grundkörpermaterial abgestimmt werden.

Zur Vorbereitung der Beschichtung wird nun die Oberfläche des Grundkörpers mit Diamantpulver beaufschlagt, d. h. bekeimt. Zur Erzielung der Porenfreiheit – auch bei geringen Schichtdicken – ist eine möglichst hohe, zum dichten Diamantwachstum führende Keimdichte erforderlich. Man bekeimt hierbei erfindungsgemäß mit einer Diamantkeimdichte  $\geq 10^{10}/\text{cm}^2$ , vorzugsweise mit einer Diamantkeimdichte, die in einem Bereich von  $10^{11}/\text{cm}^2$  bis  $10^{13}/\text{cm}^2$  liegt. Dies wird vorzugsweise dadurch erreicht, daß einerseits die Bekeimung eine hohe Anfangskeimdichte auf der Oberfläche erzeugt und andererseits eine Prozeßführung in der Anfangsphase gewählt wird, die ein Auflösen der meist sehr kleinen Keime durch Diffusion in den Grundkörper, durch Reaktion mit dem Grundkörper, beispielsweise durch Karbidbildung und durch Reaktion mit der Gasphase, beispielsweise durch Ätzen durch den in der Gasphase vorhandenen atomaren Wasserstoff, verhindert. In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird die dadurch erreicht, daß die Bekeimung mit Nano-Diamantpulver im Bereich von 5 nm bis 100 nm erfolgt. Die Bekeimung mit Nano-Diamantpulver erfolgt des weiteren vorzugsweise in einer Suspension mit organischen Lösungsmitteln, bevorzugt Ethanol.

nol. Dies wird darüber hinaus in einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung in einem Ultraschallbad durch Aufsprühen oder durch Auftragen mit einem "spin coating" Verfahren durchgeführt.

Vorzugsweise ist die Anfangsphase bis zum Beginn des Diamantwachstums möglichst kurz. Dies wird erfindungsgemäß vorzugsweise dadurch erreicht, daß das Substrat erst in Kontakt mit der aktivierten Gasphase kommt, wenn die Beschichtungstemperatur von 500°C bis 950°C, vorzugsweise von 750°C bis 850°C, erreicht ist. Dies wird entweder durch Zusatzheizung des Substrates oder durch Verwendung von Shuttern zur Trennung von Substrat und aktivierter Gasphase möglich.

Vorzugsweise wird im Anschluß an die Bekeimung die Oberfläche des Grundkörpers nochmals gereinigt, bevor es dann zu der eigentlichen Beschichtung der Oberfläche des Grundkörpers mit Diamant kommt. In manchen Fällen wird die Oberfläche des Grundkörpers nach dem ersten Beschichtungsschritt nochmals gereinigt, vorzugsweise mit Alkohol, insbesondere mit Ethanol für etwa 10 Minuten in einem Ultraschallbad. Für technische und großflächige Substrate ist nämlich zu erwarten, daß aufgrund der Fertigungsbedingungen Restverunreinigungen auf der Oberfläche trotz der Reinigung zurückbleiben. Erst dann erfolgt ein zweiter Beschichtungsschritt der Oberfläche des Grundkörpers mit Diamant.

Allerdings ist zu sagen, daß ein naßchemischer Reinigungsschritt nach der 1. Beschichtung nicht zwingend erforderlich ist. Statt dessen wird vorzugsweise ein 2. Bekeimungsschritt durchgeführt. Aufgrund der Bekeimung mit der Suspension findet einerseits eine Reinigung der Oberfläche statt. Andererseits wird im Falle der Verwendung von Ultraschallbädern eine mechanische Entfernung aller zu Poren führenden Partikel erreicht. Die zusätzliche Bekeimung sorgt andererseits dafür, daß alle noch nicht mit Diamant überwachsenen Stellen mit Diamantkeimen für den 2. Beschichtungsprozeß versehen werden.

Durch das erfindungsgemäße vorzugsweise mindestens zweimalige Beschichten der Oberfläche des Grundkörpers mit Diamant erreicht man nun, daß die nach dem ersten Beschichten noch verbleibenden Poren mit Diamant geschlossen werden und so eine nachweisbar porenfreie Diamantschicht erhalten wird. Im Falle von polierten Oberflächen und staubarmen Umgebungen ist es allerdings vorstellbar, daß ein einmaliger Beschichtungsvorgang ausreicht, um Porenfreiheit zu erreichen. Dies kann insbesondere für Silicium zutreffen.

Vorzugsweise wird Schritt b) mindestens einmal, besonders bevorzugt mehrmals wiederholt, wobei vor jeder Wiederholung von Schritt b) die Oberfläche des Grundkörpers abgerieben, bzw. poliert wird. Dadurch erhält man eine sehr hohe Bekeimungsdichte auf der Oberfläche des Grundkörpers. Diese Bekeimungsdichte kann noch weiter vergrößert werden, indem die Oberfläche des Grundkörpers vorzugsweise mit einem Diamantpulver bekeimt wird, dessen Körnung im Nanometerbereich liegt. Vorzugsweise erstreckt sich der Bereich von 5 nm bis 75 µm, besonders bevorzugt von 0,25 µm bis 3 µm. Die Bekeimung erfolgt dabei vorzugsweise in einer Suspension des Nanodiamantpulvers in Ethanol in einem Ultraschallbad mit einer anschließenden Reinigung in Alkohol, vorzugsweise in Ethanol. Des weiteren kann man auch durch zusätzliches Anlegen einer Bias-Spannung an die zu beschichtende Oberfläche bewirken, daß eine ausreichende Anzahl an Diamantkeimen auf der Oberfläche des Grundkörpers deponiert wird.

Vorzugsweise wird die sich daran anschließende Beschichtung der Oberfläche des Grundkörpers mit Hilfe des bereits in der Einleitung erwähnten CVD-Verfahrens, weiter

bevorzugt mit Hilfe des Heißdraht-CVD-Verfahrens durchgeführt. Um für den Beschichtungsprozeß eine hohe Aktivierung der Gasphase zu erreichen, müssen die Temperaturen der Filamente von vorzugsweise 2000°C bis 2400°C erzielt werden. Dieser Verfahrensschritt wird erfindungsgemäß vorzugsweise bei einem Druck von etwa 10 bis 100 mbar, besonders bevorzugt von 10 mbar bis 40 mbar durchgeführt. Die Filamentabstände werden so gewählt, daß eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung erhalten wird. Wie bereits erwähnt wird zur Sicherstellung der Porenfreiheit im Sinne der vorliegenden Erfindung der Beschichtungsprozeß, d. h. Schritt c) mindestens einmal, vorzugsweise mehrfach wiederholt, wobei zwischen diesen Wiederholungen jeweils ein Reinigungsschritt durchgeführt wird. Nach jedem Beschichtungsschritt gemäß Schritt c) des erfindungsgemäßen Verfahrens wird nach Abkühlung der Druck in der Beschichtungskammer vorzugsweise auf Normaldruck erhöht. Durch den Druckanstieg werden lose Partikel von der Oberfläche des Grundkörpers entfernt. Durch das erfindungsgemäße wiederholte Beschichten werden die wenigen noch verbleibenden Poren geschlossen.

In einer bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens umfaßt der Grundkörper einen Kern und eine auf den Kern aufgetragene Zwischenschicht, auf die wiederum die Diamantschicht aufgebracht wird. Der Kern besteht hierbei vorzugsweise aus einem oder mehreren der folgenden Substrate, nämlich Graphit und/oder Silicium (Si) und/oder Titan (Ti) und/oder Molybdän (Mo). Für die Zwischenschicht wird vorzugsweise Gold und/oder Platin und/oder Chrom eingesetzt. Platin hat gegenüber Gold den Vorteil, daß die aufzubringende Diamantschicht bei höheren Temperaturen aufgebracht werden kann, was wiederum eine bessere Phasenreinheit und in der Regel eine höhere Abscheiderate der Diamantschicht zur Folge hat. Diese Zwischenschichten dienen als Diffusionsbarriere für die auf der Oberfläche auftretenden verschiedenen Kohlenstoffmodifikationen und bieten gleichzeitig auch eine bessere Haftung für die aufzubringende Diamantschicht. Die stattfindenden Oberflächenreaktionen hängen aber neben der Zusammensetzung der Oberfläche auch empfindlich von der Temperatur der Oberfläche ab. Die maximale Substrattemperatur ist im Bereich unter 950°C, abhängig von den zu beschichtenden Materialien. Bei Ti ist sie beispielsweise  $\leq 750^\circ\text{C}$ , bei Au  $\leq 850^\circ\text{C}$  und bei Ta  $\leq 950^\circ\text{C}$ . Beim Beschichten mit Diamant mittels des Heißdraht-CVD-Verfahrens ist eine Obergrenze von 950°C dadurch bedingt, daß die CVD-Diamantabscheidung stark abnimmt und bei Temperaturen oberhalb von 1100°C nicht mehr stattfindet. Erfindungsgemäß werden der Filamentdurchmesser und die Filamentabstände sowie der Abstand zwischen den jeweiligen Filamenten und dem Substrat optimiert bzw. den Versuchsbedingungen angepaßt.

In einer anderen bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird für den Grundkörper Metall verwendet, vorzugsweise ein carbidbildendes Metall oder Silicium (Si). Bei Verwendung carbidbildender Metalle entfällt die zusätzliche Aufbringung einer Zwischenschicht. Während des Beschichtens mit Diamant bildet sich zunächst eine Carbidschicht, auf der sich wiederum der Diamant abscheidet. Dies erfolgt alles in einem Prozeßschritt. Die zwischen Metall- und Diamantschicht gebildete Carbidschicht unterstützt die Haftung der Diamantschicht. Es können hier auch Silicide, Boride und Carbide, so z. B. Siliciumcarbid verwendet werden.

In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist der Borgehalt der Diamantschicht variabel. Während man bisher daran interessiert war möglichst borreiche, homogene Diamantschichten abzuscheiden, um die Leitfähigkeit der Diamantschicht zu maxi-

mieren, hat sich nun gezeigt, daß der Borgehalt das Redoxfenster der Diamantelektroden deutlich beeinflußt und zwar derart, daß der Borgehalt das Redoxfenster erheblich verkleinert. Daher wird der Borgehalt erfindungsgemäß variabel gehalten und gleichzeitig möglichst klein gewählt. Er kann zwischen 10 ppm und 10000 ppm variiert werden. Vorzugsweise verwendet man Borgehalte zwischen 10 ppm und 2000 ppm, besonders bevorzugt zwischen 50 ppm und 1000 ppm. Beim Beschichtungsprozeß wird erfindungsgemäß vorzugsweise soviel Trimethylborat zugesetzt, daß das Verhältnis zu Methan 1 : 1 nicht überschreitet.

In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird die zu beschichtende Oberfläche des Grundkörpers während des Herstellungsverfahrens der Diamantschicht auf dem Grundkörper senkrecht aufgestellt. Es verhindert die Anlagerung von auf das Substrat herunterfallende Partikel während der Abscheidung, beispielsweise von abplatzenden Beschichtungen an den Reaktorwänden. Dadurch läßt sich ergänzend zu der erfindungsgemäßen mehrmaligen Beschichtung ebenfalls die Porenfreiheit im Sinne der Erfindung optimieren.

Ebenso betrifft die Erfindung eine Elektrode, die einen Grundkörper und eine auf dem Grundkörper aufgetragene Diamantschicht aufweist. Der Grundkörper weist dabei vorzugsweise eine oder mehrere der folgenden Materialien auf: Carbide, Silicide und Boride. In einer anderen bevorzugten Ausführungsform besteht der Grundkörper aus einem Metall, besonders bevorzugt aus einem carbidbildenden Metall.

In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Elektrode umfaßt der Grundkörper einen Kern und eine auf dem Kern aufgetragene Zwischenschicht. Der Kern enthält dabei vorzugsweise Graphit oder Titan oder Molybdän oder Gold oder eine Kombination aus zwei oder mehr davon. In einer bevorzugten Ausführungsform besteht die auf dem Kern aufgetragene Zwischenschicht aus Gold oder Platin oder einem Gemisch aus Gold und Platin.

In einer bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Elektrode ist der Borgehalt der Diamantschicht vergleichsweise gering. Vorzugsweise liegt er in einem Bereich von 10 ppm bis 2000 ppm.

Die Dicke der Diamantbeschichtung der erfindungsgemäßen Elektrode liegt vorzugsweise in einem Bereich von 1 bis 50 µm, weiter bevorzugt 1 bis 10 µm.

Ferner bezieht sich die vorliegende Erfindung auf ein Verfahren zur elektrochemischen Umsetzung mindestens einer organischen Verbindung, wobei mindestens eine organische Verbindung mit einer erfindungsgemäßen Elektrode oder einer Elektrode, hergestellt nach einem erfindungsgemäßen Verfahren in Kontakt gebracht wird. Die Erfindung bezieht sich bei Formen der Umsetzung vorzugsweise auf Oxidationen und/oder Reduktionen und/oder elektrochemische Funktionalisierungen von organischen Verbindungen und/oder Gemischen aus zwei oder mehreren organischen Verbindungen. Hierbei seien insbesondere Halogenierungen, Acetoxylierungen und Methoxylierungen genannt.

Es ist erfindungsgemäß notwendig, daß mindestens eine der verwendeten Elektroden eine Diamantelektrode gemäß der vorliegenden Erfindung ist. Vorzugsweise sind sowohl Kathode als auch Anode eine Diamantelektrode gemäß der vorliegenden Erfindung.

Sofern eine Ausführungsform gewählt wird, bei der lediglich eine Diamantelektrode gemäß der vorliegenden Erfindung eingesetzt wird, kann die andere Elektrode bzgl. des verwendeten Materials und ihrer Form in Abhängigkeit von der Umsetzung und der vorhandenen Chemie frei gewählt werden. Als Material für eine nicht erfindungsgemäße Elektrode kann man im allgemeinen perforierte Materialien, wie Netze, Streckmetallbleche, Lamellen, Profilstege, Gitter und

glatte Bleche verwenden. Derartige perforierte Materialien werden vorzugsweise auch für den Grundkörper der erfindungsgemäßen Diamantelektrode eingesetzt. Bei einer planparallelen Elektrodenanordnung geschieht dies in Form ebener Flächen, bei der Ausführungsform mit kerzenförmigen Elektroden in Form einer zylindrischen Anordnung.

Die Wahl des Werkstoffes der anderen Elektrode bzw. seiner Beschichtung ist abhängig vom Lösungsmittel des Anolyten und/oder Katholyten. So werden in organischen Systemen vorzugsweise Graphitelektroden eingesetzt, während in wasserhaltenden Systemen vorzugsweise Werkstoffe oder Beschichtungen mit geringer Sauerstoffsüberspannung eingesetzt werden. Für saure Anolyte sind dabei beispielsweise Titan- oder Tantalträger mit elektrisch leitenden Zwischenschichten, auf welche elektrisch leitende Mischoxide der IV. bis VI. Nebengruppe aufgebracht werden, die mit Metallen oder Metalloxiden der Platingruppe dotiert sind, zu nennen. Bei basischen Anolyten kommen bevorzugt Eisen- oder Nickelanoden zum Einsatz. Im Falle der Kathoden werden in organischen Systemen ebenfalls Graphit, Edelstahl, Platin oder Nickel bevorzugt. In wasserhaltenden Systemen werden vorzugsweise Kupfer, Zink, Nickel, Blei, Edelstahl, Platin und Graphit als Kathodenmaterial eingesetzt.

Im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens hat die Art des verwendeten Zellentyps, die Form und die Anordnung der Elektroden keinen entscheidenden Einfluß, so daß prinzipiell alle in der Elektrochemie üblichen Zellentypen verwendet werden können.

Beispielhaft genannt seien die beiden folgenden Apparativvarianten:

#### a) ungeteilte Zellen

Ungeteilte Zellen mit planparalleler Elektrodenanordnung kommen bevorzugt dann zum Einsatz, wenn weder Edukte noch Produkte, die an Anode oder Kathode hergestellt oder umgesetzt werden, in störender Weise durch den jeweils anderen Elektrodenprozeß verändert werden oder miteinander reagieren. Vorzugsweise werden die Elektroden planparallel angeordnet, weil bei dieser Ausführungsform bei kleinem Elektrodenpalt (0,5 mm bis 30 mm, vorzugsweise 1 bis 10 mm) eine homogene Stromverteilung gegeben ist. Vorzugsweise können in diesem Fall die Elektroden einzeln oder zu mehreren gestapelt angewendet werden. Im letzteren Fall handelt es sich um die Verwendung von sogenannten Stapelelektroden, die in der sogenannten Plattenstapelzelle seriell bipolar geschaltet werden können und deren eine oder beide Flächen der einzelnen Stapeleinheit mit Diamant beschichtet sein können.

#### b) geteilte Zellen

Geteilte Zellen mit planparalleler Elektrodenanordnung oder kerzenförmigen Elektroden kommen vorzugsweise dann zum Einsatz, wenn der Katholyt vom Anolyten getrennt sein muß, um z. B. chemische Nebenreaktionen auszuschließen oder um die nachfolgende Stofftrennung zu vereinfachen. Als Trennmedium können Ionenaustauschermembranen, mikroporöse Membranen, Diaphragmen, Filtergewebe aus nichtelektronenleitenden Materialien, Glasfritten sowie poröse Keramiken eingesetzt werden. Vorzugsweise werden Ionenaustauschermembranen, insbesondere Kationenaustauschermembranen, verwendet, wobei darunter wiederum solche Membranen vorzugsweise verwendet werden, die aus einem Copolymer aus Tetrafluorethylen und einem perfluorierten Monomer, das Sulfogruppen enthält, bestehen. Vorzugsweise werden auch bei geteilten Zellen die Elektroden planparallel

angeordnet, da bei dieser Ausführungsform bei kleinen Elektrodenpalt zwei Spalte zu je 0 mm bis 10 mm, bevorzugt anodisch 0 bis 3 mm, kathodisch 0 bis 3 mm) eine homogene Stromverteilung gegeben ist.

In dem erfindungsgemäßen Verfahren zur elektrochemischen Umsetzung ist es bevorzugt, daß die Spannung im Bereich von 1 bis 100, bevorzugt von 2 bis 50 und besonders bevorzugt von 4 bis 15 V liegt. Es ist vorteilhaft, wenn in dem Verfahren zur elektrochemischen Umsetzung die Spannung so ausgewählt wird, daß die Stromdichte im Bereich von 1 bis 50, bevorzugt von 5 bis 20 und besonders bevorzugt von 8 bis 13 mA/cm<sup>2</sup> liegt.

Die erfindungsgemäße elektrochemische Umsetzung wird vorzugsweise in einem Temperaturbereich von 0 bis 100, bevorzugt von 10 bis 70 und besonders bevorzugt von 15 bis 55°C durchgeführt.

Darüber hinaus hat es sich bei der erfindungsgemäßen elektrochemischen Umsetzung bewährt, eine Ladungsmenge im Bereich von 1 bis 10, bevorzugt von 2 bis 7 und besonders bevorzugt von 3 bis 6 F einzusetzen.

Im allgemeinen wird die erfindungsgemäße Umsetzung in Gegenwart eines Hilfselektrolyten vorgenommen. Die Zugabe desselben dient zur Einstellung der Leitfähigkeit der Elektrolyselösung und/oder zur Steuerung der Selektivität der Reaktion. Der Gehalt des Elektrolyten liegt in der Regel bei einer Konzentration von ungefähr 0,1 bis ungefähr 10, vorzugsweise ungefähr 0,2 bis ungefähr 5 Gew.-%, weiter bevorzugt ungefähr 0,5 bis ungefähr 4 Gew.-%, jeweils bezogen auf das Umsetzungsgemisch. Als Hilfselektrolyt kommen Protonensäuren, wie z. B. organische Säuren, wobei Methylsulfonsäure, Benzolsulfonsäure oder Toluolsulfonsäure genannt werden können, und mineralische Säuren, wie z. B. Schwefelsäure und Phosphorsäure, in Betracht. Ferner können als Hilfselektrolyte auch Neutralsalze verwendet werden. Als Kationen kommen dabei Metallkationen von Lithium, Natrium, Kalium, aber auch Tetraalkylammoniumkationen, wie z. B. Tetramethylammonium, Tetraethylammonium, Tetrabutylammonium und Dibutyldimethylammonium in Frage. Als Anionen sind zu nennen: Fluorid, Tetrafluoroborat, Sulfonat, wie z. B. Methylsulfonat, Benzolsulfonat, Toluolsulfonat, Sulfate, wie z. B. Sulfat, Methylsulfat, Ethylsulfat, Phosphate, wie z. B. Methylphosphat, Ethylphosphat, Dimethylphosphat, Diphenylphosphat, Hexafluorophosphat, Phosphonate, wie z. B. Methylphosphonatmethylester und Phenylphosphonatmethylester.

Weiterhin sind auch basische Verbindungen, wie z. B. Alkali- oder Erdalkalimetallhydroxide, -carbonate, -hydrogencarbonate und -alkoholate einsetzbar, wobei als Alkoholatationen Methylat, Ethylat, Butylat und Isopropylat vorzugsweise eingesetzt werden.

Als Kationen in diesen basischen Verbindungen kommen wieder die oben genannten Kationen in Frage.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann nicht nur unter Verwendung einer homogenen Lösung der umzusetzenden organischen Verbindung in einem geeigneten Lösungsmittel durchgeführt werden, sondern auch in einem Zweiphasensystem bestehend aus einer Phase enthaltend mindestens ein organisches Lösungsmittel, wie nachfolgend definiert, und die umzusetzende organische Verbindung, und einer zweiten, wasserhaltigen Phase oder aber in Substanz.

Als Lösungsmittel kommen Einzellösungsmittel oder Lösungsmittelgemische in Betracht. Als Lösungsmittel kommen alle protischen Lösungsmittel in Frage, d. h. Lösungsmittel, die Protonen enthalten oder freisetzen können und/oder Lösungsmittel, die Wasserstoffbrückenbindungen ausbilden können, wie z. B. Alkohole, Amine, Carbonsäuren

usw. gegebenenfalls im Gemisch mit aprotisch polaren Lösungsmitteln, wie z. B. Tetrahydrofuran, Acetonitril oder letztere als alleiniges Lösungsmittel. Vorzugsweise werden wegen der aufrecht zu erhaltenden Leitfähigkeit niedere Alkohole wie Methanol, Ethanol, 1-Propanol, Isopropanol, 1-Butanol, sec.-Butanol oder tert. Butanol, Ether, wie Diethylether, 1,2-Dimethoxyethan, Furan, Tetrahydrofuran und Dimethylformamid eingesetzt. Weiter kann Wasser den Lösungsmitteln beigemischt sein, wobei ggf. ein Gemisch mit einem oder mehreren der oben genannten Alkohole, Ether, DMF eingesetzt wird, wobei ein Gemisch aus Wasser mit Methanol, THF, Dimethoxyethan oder DMF bevorzugt ist. Neben diesen Alkoholen können auch die korrespondierenden Säuren eingesetzt werden, vorzugsweise Fettsäuren, so z. B. Ameisensäure, Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, Valeriansäure, Capronsäure, Önanthsäure, Caprylsäure, Pelargonensäure, Caprinsäure, Undecansäure, Laurinsäure, Tridecansäure, Myristinsäure, Pentadecansäure, Palmitinsäure, Margarinsäure, Stearinsäure, Nonadecansäure, Isobuttersäure, Isovaleriansäure.

Die erfindungsgemäße elektrochemische Umsetzung kann entweder kontinuierlich oder diskontinuierlich durchgeführt werden.

Als organische Verbindungen sind im erfindungsgemäßen Verfahren prinzipiell alle organischen Verbindungen mit elektrochemisch umsetzbaren, insbesondere oxidierbaren, reduzierbaren und funktionalisierbaren Gruppen als Edukte einsetzbar. Dabei können als Produkte, in Abhängigkeit von der insgesamt zugegebenen Strommenge, sowohl teilweise umgesetzte Verbindungen als auch vollständig umgesetzte, d. h. z. B. vollständig oder teilweise reduzierte oder oxidierte Verbindungen erhalten werden. So kann beispielsweise ausgehend von einem Alkin das korrespondierende Alken ebenso erhalten werden wie das entsprechende vollständig reduzierte Alkan.

Erfindungsgemäß bevorzugte elektrochemische Umsetzungen sind die Oxidation oder Reduktion. Unter diesen Umsetzungen sind die Arylierung, Alkinylierung sowie die Bildung von Alkoholen, Ethern, Ketonen, Aldehyden, Carbonsäuren, Estern, Olefinen, Amiden und Oxoamiden besonders bevorzugt. Darüber hinaus bevorzugt ist die Halogenierung, insbesondere die Fluorierung, Chlorierung, Bromierung und besonders bevorzugt die Chlorierung.

Durch das erfindungsgemäße Verfahren können insbesondere folgende Klassen organischer Verbindungen reduziert werden:

Organische Verbindungen, die mindestens eine C-C-Doppelbindung aufweisen, wie z. B. ungesättigte Carbonsäuren, aromatische Verbindungen, die durch eine oder mehrere Alkenylgruppen substituiert sind.

Organische Verbindungen, die mindestens eine C-C-Dreifachbindung aufweisen.

Organische Verbindungen, die mindestens einen aromatischen C<sub>6</sub>-Ring aufweisen, wie z. B. alle aromatischen monocyclischen oder polycyclischen Kohlenwasserstoffe sowie monocyclische substituierte aromatische Verbindungen, wobei insbesondere die Substitution mit Halogen-, Alkyl-, Acyl- und/oder Alkoxygruppen bevorzugt ist.

Organische Verbindungen, die mindestens einen heterocyclischen Ring aufweisen, wie z. B. 5-, 6- oder höhergliedrige, ungesättigte Heterocyclen, die 1 bis 3 Stickstoffatome und/oder ein Sauerstoff- oder Schwefelatom enthalten.

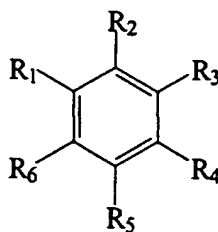
Organische Verbindungen, die mindestens eine Struktureinheit C=X aufweisen, wobei X eine NR<sub>1</sub>-Gruppe, Sauerstoff und/oder Schwefel sein kann, wobei R<sub>1</sub> eine Alkylgruppe, eine Arylgruppe, eine Alkoxygruppe, Wasserstoff oder eine Hydroxylgruppe sein kann. Die obige Definition umfaßt alle organischen Verbindungen, die mindestens eine

Kohlenstoff-Heteroatom-Doppelbindung aufweisen, wie z. B. Aldehyde, Ketone sowie die entsprechenden Thioverbindungen und Imine.

Organische Verbindungen, die mindestens eine C-N-Dreifachbindung aufweisen, wie z. B. Dinitrile und Mononitrile.

Organische Verbindungen, die eine Struktureinheit C-Z aufweisen. Diese Definition umfaßt alle organischen Verbindungen, die Halogenatome, insbesondere Chlor, Brom und/oder Iod oder eine Oxyalkylgruppe aufweisen, wie z. B. gesättigte Kohlenwasserstoffe oder aromatische Kohlenwasserstoffe, die durch mindestens eine der oben genannten Gruppen substituiert sind.

Ein weiteres erfindungsgemäß bevorzugtes Verfahren ist die Oxidation von Aromaten wie substituierten Benzolen, substituierten Toluolen und substituierten oder unsubstituierten Naphthalinen. Ganz allgemein lassen sich dabei Aromaten der nachstehenden Formel umsetzen:



wobei R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>, R<sub>5</sub> und R<sub>6</sub> jeweils unabhängig voneinander H; Alkyl; Aryl; OR, mit R = H, Alkyl, Aryl, CO-R', mit R' = Alkyl und Aryl; COOR, wobei R = H, Alkyl, oder Aryl ist; COR, wobei R = Alkyl, oder Aryl ist, Nitro; F, Cl, Br, I; CONR'R'', wobei R' und R'' Alkyl, Aryl und Alkyl- oder Aryloxymethylen und Alkyl- oder Aryloxyethylen sein können; NR'R'', mit R' und R'' = H, Alkyl, Aryl, und Alkyl- oder Aryloxymethylen und Alkyl- oder Aryloxyethylen sind; weiterhin können R<sub>1</sub> und R<sub>2</sub> oder R<sub>4</sub> und R<sub>5</sub> Teile eines weiteren kondensierten Ringsystems sein, welches aromatisch oder heteroaromatisch sein kann. Die Alkylketten können verzweigt oder unverzweigt sein. In dieser Ausführungsform besonders bevorzugt sind Verfahren zur Alkoxylierung, vorzugsweise Methoxylierung von 4-Methoxytoluol, p-Xylol, p-tert.-Butyltoluol, 2-Methylnaphthalin, Anisol oder Hydrochinondimethylether. Weiterhin bevorzugt ist die Umsetzung von Toluol- und Benzolderivaten, wie z. B. Chlorbenzol, 1,2-Dichlorbenzol, 1,3-Dichlorbenzol, 1,4-Dichlorbenzol und analog die fluorierten, bromierten und iodierten Benzole. Weitere Substrate sind Fluor-, Chlor-, Brom- und Iodtoluole, die ortho-, meta- und para-substituiert sein können, ebenso Nitrobenzole oder Nitrotoluole, insbesondere Nitrobenzol, m-, o-, p-Dinitrobenzol, m-, o-, p-Nitrotoluol, 2,4- und 2,6-Dinitrotoluol oder Monoacetyl- oder Bisacetyl-substituierte Toluole und Benzole.

Die vorgenannten organischen Verbindungen können durch das Verfahren zur elektrochemischen Reaktion auch acyloxyliert werden.

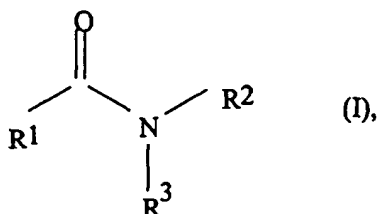
Ein anderes bevorzugtes Verfahren zur elektrochemischen Umsetzung bezieht sich auf die anodische Dimerisierung von substituierten sowie unsubstituierten Benzolen, Toluolen und Naphthalinen, wobei die zuvor genannten organischen Verbindungen vorzugsweise mit C<sub>1</sub>- bis C<sub>5</sub>-Alkylketten substituiert sind. Vorteilhaft kann das erfindungsgemäße Verfahren auch zur Alkoxylierung, vorzugsweise Methoxylierung oder Hydroxylierung von Carbonylverbindungen, insbesondere von Cyclohexanon, Aceton, Butanon oder substituierten Benzophenonen eingesetzt werden.

Ein anderes bevorzugtes Verfahren ist die Oxidation von

Alkoholen oder Carbonylverbindungen zu Carbonsäuren, beispielsweise von Butandiol zu Acetylendicarbonsäure oder von Propargylalkohol zu Propiolsäure.

Weiterhin bevorzugt ist die Kolbereaktion, die elektrochemische Decarboxylierung von aliphatischen Carbonsäuren zur Kupplung der Carbonsäurereste zur Synthese von Alkanen; weiterhin zur Synthese von Alkoholen, Ethern und durch Radikale induzierte Verbindungen. Ein anderes bevorzugtes Verfahren ist die Umsetzung von offenkettigen und cyclischen Kohlenwasserstoffen, um die in Allylstellung methoxylierten und doppeltmethoxylierten Produkte zu erhalten, besonders bevorzugt ist hier die Synthese von Cyclohex-2-enylmethylether oder 1,1-Dimethoxy-2-cyclohexan ausgehend von Cyclohexan.

Das Verfahren kann vorteilhafterweise auch zur Funktionalisierung von Amiden eingesetzt werden. Besonders geeignete Amide sind in der allgemeinen Formel (I) dargestellt



wobei R<sup>1</sup> eine verzweigt-kettige oder lineare C<sub>1</sub>- bis C<sub>20</sub>-Alkyl-, -Cycloalkyl-, Aryl-, Aralkyl-Gruppe, und R<sup>2</sup> oder R<sup>3</sup> unabhängig voneinander eine C<sub>1</sub>- bis C<sub>20</sub>-Alkylgruppe bedeuten. Die Alkoxylierung ist die bevorzugteste Funktionalisierung. Besonders bevorzugt wird Dimethylformamid zu N-Monomethoxymethyl-N-methylformamid umgesetzt.

Ferner eignet sich das erfindungsgemäße Verfahren zur elektrochemischen Reaktion auch zur Oxidation, Reduktion oder Funktionalisierung von Heterocyclen. Bevorzugte Heterocyclen weisen 3 bis 7, bevorzugt 4 bis 6 und besonders bevorzugt 4 bis 5 Kohlenstoffatome auf. Die Heterocyclen können 1 bis 3, bevorzugt 1 bis 2 und besonders bevorzugt 1 Heterogruppe oder Heteroatom aufweisen. Bevorzugte Heterogruppen bzw. Heteroatome sind solche, die NH, O und S aufweisen. Weiterhin ist es bevorzugt, daß die Heterocyclen mindestens eine Doppelbindung, bevorzugt zwei Doppelbindungen aufweisen. Ferner können die Heterocyclen substituiert sein, wobei Halogene und C<sub>1</sub>-C<sub>20</sub>-Alkylgruppen besonders bevorzugte Substituenten sind. Als elektrochemische Umsetzungen an Heterocyclen sind insbesondere die Umsetzung von Tetrahydrofuran zu 2-Monomethoxytetrahydrofuran und 2,5-Dimethoxytetrahydrofuran oder von Furan zu Dimethoxydihydrofuran sowie die Umsetzung von N-Methylpyrrolidon-2 zu 5-Methoxy-N-Methylpyrrolidon-2 bevorzugt.

Die vorliegende Erfindung soll nunmehr anhand einiger Beispiele erläutert werden.

#### Beispiele

##### Beispiel 1

In Beispiel 1 wird eine Möglichkeit der Herstellung einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Elektrode aufgezeigt. Dabei wird ein graphitischer Grundkörper galvanisch mit einer dünnen (10–50 nm), metallischen Zwischenschicht (Au, Pt, Cr) versehen, um unter Beschichtungsbedingungen, d. h. unter Anwesenheit einer hohen Konzentration von atomarem Wasserstoff, keine undefinierte Ätzung des Grundkörpers zu erhalten und eine gute Haftung der Diamantschicht zu erzielen. Die Vorbekeimung der Elektro-

den erfolgt in einer Suspension von Nanodiamantpulver in Ethanol in einem Ultraschallbad mit einer anschließenden Reinigung in Ethanol. Für den Beschichtungsprozeß muß eine hohe Aktivierung der Gasphase durch Temperaturen der Filamente von 2000°C bis 2400°C erzielt werden, wobei substratseitig die Temperaturen aufgrund der metallischen Zwischenschicht nicht höher als 850°C sein sollen. Hier werden die Filamentdurchmesser, die Filament-Abstände und die jeweiligen Abstände zwischen den Filamenten und dem Substrat entsprechend angepaßt. Der Gasphase, die zu etwa 99% aus molekularem Wasserstoff besteht, wird soviel Trimethylborat zugesetzt, daß das Verhältnis zu Methan 1 : 1 nicht überschreitet, bevorzugt liegt das Verhältnis bei 1 : 2. Der Prozeßdruck wird auf 10–50 mbar eingestellt. Zur Sicherstellung der Porenfreiheit wird der Beschichtungsprozeß mehrfach wiederholt, wobei nach Abkühlung der Druck in der Beschichtungskammer mindestens auf Normaldruck erhöht wird. Durch den Druckanstieg werden lose Partikel von der Substratoberfläche entfernt. Im Falle von rauen Substratoberflächen findet vorzugsweise eine erneute Reinigung in Ethanol statt. Eine andere Möglichkeit besteht darin, einen 2. Bekeimungsschritt anstelle eines Reinigungsschrittes durchzuführen. Aufgrund der Bekeimung mit der Suspension findet einerseits eine Reinigung der Oberfläche statt. Andererseits wird im Falle der Verwendung von Ultraschallbädern eine mechanische Entfernung aller zu Poren führenden Partikel erreicht. Die zusätzliche Bekeimung sorgt andererseits dafür, daß alle noch nicht mit Diamant überwachsenen Stellen mit Diamantkeimen für den 2. Beschichtungsprozeß versehen werden. Anschließend wird ein weiterer Beschichtungsprozeß durchgeführt, bei dem die noch vorhandenen Poren geschlossen werden.

Für die folgenden Beispiele wurde eine ungeteilte Elektrolysezelle von 70 cm<sup>3</sup> mit einem beheizbaren Umpumpkreislauf verwendet, eine diamantbeschichtete Elektrode nach Beispiel 1 und eine Edelstahlelektrode als Kathode. Die Temperierung erfolgte durch einen Intensivkühler, der an den Elektrolysekreislauf angeschlossen ist.

##### Beispiel 2

##### Oxidation von Cyclohexen

5 g Cyclohexen und 50 g MTBS werden in 40 g Methanol und 160 g THF gelöst und bei einer Stromdichte von 11 mA/cm<sup>2</sup> beispielsweise mit einer gemäß Beispiel 1 hergestellten Elektrode elektrolysiert. Nach einer applizierten Ladungsmenge von 5 F erhält man 61% Monomethoxycyclohexen.

##### Beispiel 3

##### Oxidation von Cyclohexanon

5 g Cyclohexanon und 3 g KI und 1 g Wasser werden in 191 g MeOH gelöst und bei einer Stromdichte von 11 mA/cm<sup>2</sup> beispielsweise mit einer gemäß Beispiel 1 hergestellten Elektrode elektrolysiert. Nach einer applizierten Ladungsmenge von 3,4 F erhält man 89% Dimethoxycyclohexanol.

##### Beispiel 4

##### Oxidation von Dimethylformamid (DMF)

5 g DMF und 6 g Natriumbenzolsulfonat werden in 190 g Methanol gelöst und bei 25°C und 11 mA/cm<sup>2</sup> beispielsweise mit einer gemäß Beispiel 1 hergestellten Elektrode



elektrolysiert. Nach einer applizierten Ladungsmenge von 2F wurden 96,4% N-Monomethoxymethyl-N'-methylformamid erhalten.

#### Beispiel 5

#### Oxidation von Tetrahydrofuran (THF)

5 g THF und 6 g Natriumbromid wurden in 190 g Methanol gelöst und bei einer Stromdichte von 11 mA/dm<sup>2</sup> beispielsweise mit einer gemäß Beispiel 1 hergestellten Elektrode elektrolysiert. Nach einer applizierten Ladungsmenge von 8F wurden 12% an Monomethoxytetrahydrofuran erhalten. Mit Natriumbenzolsulfonat erhält man mit 44% nach 8F eine wesentlich bessere Ausbeute an Monomethoxytetrahydrofuran.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer mit Diamant beschichteten Elektrode, wobei das Verfahren mindestens die folgenden Schritte umfaßt:
  - a) Reinigen der Oberfläche des Grundkörpers;
  - b) Bekeimen der Oberfläche des Grundkörpers mit einer hohen Diamantkeimdichte;
  - c) Beschichten der Oberfläche des Grundkörpers mit Diamant.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß Schritt c) mindestens einmal wiederholt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß Schritt b) mindestens einmal, vorzugsweise mehrmals wiederholt wird, wobei vor jeder Wiederholung von Schritt b) die Oberfläche des Grundkörpers gereinigt wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Beschichten mit Hilfe des CVD-Verfahrens, vorzugsweise mit Hilfe des Heißdraht-CVD-Verfahrens, durchgeführt wird.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß für das Bekeimen der Oberfläche des Grundkörpers ein Diamantpulver verwendet wird, dessen Körnung im Nanometerbereich liegt, bevorzugt in einem Bereich von 5 nm bis 100 nm.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Bekeimen der Oberfläche des Grundkörpers in einer Suspension mit organischen Lösungsmitteln, bevorzugt mit Ethanol, stattfindet.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Verfahren, dadurch gekennzeichnet, daß das Bekeimen der Oberfläche des Grundkörpers in einem Ultraschallbad durch Aufsprühen und/oder Auftragen mit einem spin-coating Verfahren erfolgt.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Grundkörper einen Kern und eine auf dem Kern aufgebrachte Zwischenschicht umfaßt.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Kern Graphit oder Titan (Ti) oder Molybdän (Mo) oder Gold (Au) oder Silicium (Si) oder eine Kombination aus zwei oder mehr davon enthält.
10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, daß die auf dem Kern aufgebrachte Zwischenschicht aus Gold oder Platin oder einem Gemisch aus Gold und Platin besteht.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden An-

sprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Grundkörper aus einem Metall, vorzugsweise einem carbidbildenden Metall oder Silicium besteht.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Borgehalt der Diamantschicht in einem Bereich von 10 ppm bis 2000 ppm, bevorzugt von 50 ppm bis 1000 ppm liegt.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Grundkörper während des Verfahrens senkrecht aufgestellt ist.

14. Elektrode, bestehend aus einem Grundkörper und einer auf dem Grundkörper aufgetragenen Diamantschicht, dadurch gekennzeichnet, daß die aufgetragene Diamantschicht porenfrei ist.

15. Elektrode nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß der Grundkörper eines oder mehrere der folgenden Materialien aufweist: Silicide, Carbide und Boride.

16. Elektrode nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß der Grundkörper aus einem Metall oder Silicium, vorzugsweise aus einem carbidbildenden Material besteht.

17. Elektrode nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß der Grundkörper einen Kern und eine auf dem Kern aufgetragene Zwischenschicht umfaßt.

18. Elektrode nach einem der Ansprüche 14 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß der Kern Graphit oder Titan (Ti) oder Molybdän (Mo) oder Gold (Au) oder Silicium (Si) oder eine Kombination aus zwei oder mehr davon enthält.

19. Elektrode nach einem der Ansprüche 14 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die auf dem Kern aufgetragene Zwischenschicht aus Gold oder Platin oder einem Gemisch aus Gold und Platin besteht.

20. Elektrode nach einem der Ansprüche 14 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß der Borgehalt der Diamantschicht in einem Bereich von 10 ppm bis 2000 ppm, bevorzugt von 50 ppm bis 1000 ppm liegt.

21. Elektrode nach einem der Ansprüche 14 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke der Diamantbeschichtung der Elektrode im Bereich von 1 µm bis 50 µm liegt.

22. Verfahren zur elektrochemischen Umsetzung mindestens einer organischen Verbindung, wobei die mindestens eine organische Verbindung mit einer Elektrode gemäß einem der Ansprüche 14 bis 21 oder einer Elektrode, hergestellt nach einem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 13 in Kontakt gebracht wird.

23. Verfahren nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß die Umsetzung eine Oxidation, Reduktion oder elektrochemische Funktionalisierung ist.

24. Verfahren nach Anspruch 22 oder 23, wobei die Umsetzung aus folgenden Reaktionen ausgewählt wird:

Oxidation oder Dimerisierung mindestens einer aromatischen Verbindung; Methoxylierung oder Hydroxylierung mindestens einer Carbonylverbindung; Oxidation mindestens eines Alkohols und/oder mindestens einer Carbonylverbindung zu mindestens einer Carbonsäure; Funktionalisierung mindestens eines Amids; und Reduktion, Oxidation oder Funktionalisierung mindestens einer heterocyclischen Verbindung.

25. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 24, wobei die organische Verbindung ausgewählt wird unter aromatischen Verbindungen, insbesondere substituierten Benzolen, substituierten Toluolen oder substituierten oder unsubstituierten Naphthalinen und diese

oxidiert werden und/oder anodisch dimerisiert werden.  
26. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 24,  
wobei die aromatische Verbindung 4-Methoxytoluol,  
p-Xylol, p-tert.-butyltoluol, 2-Methylnaphthalin, Ani-  
sol, Hydrochinondimethylether, Chlorbenzol, 1,2-Di- 5  
chlorbenzol, 1,3-Dichlorbenzol, 1,4-Dichlorbenzol,  
eine analoge fluorierte, bromierte oder iodierte Ben-  
zole, Fluor-, Chlor-, Brom- und Iodtoluole, die ortho-,  
meta- und para-substituiert sein können, Nitrobenzol,  
m-, o-, p-Dinitrobenzol, m-, o-, p-Nitrotoluol, 2,4- und 10  
2,6-Dinitrotoluol oder monoacetyl- oder bisacetylsub-  
stituierte Toluole oder Benzole oder eine Kombination  
aus zwei oder mehr ist und diese alkoxyliert oder acy-  
loxyliert wird.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -